

锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究

李宏哲^{1,2}, 夏才初^{1,2}, 闫子舰^{1,2}, 蒋坤^{1,2}, 杨林德^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 结合锦屏水电站深埋引水隧洞开挖工程, 选取该区域典型大理岩, 并以隧洞围岩实际应力环境为基础, 开展卸围压破坏试验以及卸围压多级破坏试验。研究成果表明, 锦屏大理岩在高应力条件下的卸荷力学性质主要表现为: (1) 相同初始应力条件下, 岩石达到卸荷破坏所需应力变化量比轴向压缩破坏时小, 卸荷更容易导致岩石破坏; (2) 岩石卸荷开始后侧向变形明显加快, 且表现出显著扩容, 如果忽略卸荷前岩样变形, 则体积变形几乎按照侧向变形的规律增大; (3) 卸围压过程中, 泊松比近似按照多项式关系增长。变形模量初始变化不显著, 屈服前微量围压减少引起变形模量急剧减小; (4) 卸荷条件下抗剪强度参数 c 值比加载条件下低 14%, 而 φ 值比加载条件下高 23%。这些结论揭示高应力条件下大理岩的卸荷力学特性, 为深埋引水隧洞开挖稳定分析提供可靠依据。

关键词: 岩石力学; 深埋隧洞; 大理岩; 卸荷破坏; 力学特性; 试验研究

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)10 - 2104 - 06

STUDY ON MARBLE UNLOADING MECHANICAL PROPERTIES OF JINPING HYDROPOWER STATION UNDER HIGH GEOSTRESS CONDITIONS

LI Hongzhe^{1,2}, XIA Caichu^{1,2}, YAN Zijian^{1,2}, JIANG Kun^{1,2}, YANG Linde^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The Jinping Hydropower Station is a large-scale national key project, of which the diversion tunnels are deep-buried. Especially the tunnels are located in a high geostress area; so it is of significance to study the variation laws of unloading mechanical properties under high geostress conditions. To simulate the tunnel excavation unloading effect, a series of triaxial unloading tests and a special designed multiple failure state unloading tests are carried out. The results show that under high geostress conditions, the unloading properties of marble specimens are as follows. (1) Under same initial stress conditions, stress needed in axial compression failure is more than that in confined unloading failure. Confining pressure reduction is prone to cause rock failure. (2) From the very beginning of unloading, the lateral deformation increases remarkably; and dilatancy presents prominently. Moreover, if the deformation caused by initial axial compression is disregarded, the volumetric deformation increasing is dominated by lateral deformation. (3) During the unloading stage, the relationship between Poisson's ratio rises up; and the confining pressure could be well described by biquadrate. The

收稿日期: 2007 - 06 - 01; **修回日期:** 2007 - 06 - 22

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50579088, 50639090)

作者简介: 李宏哲(1978 -), 男, 2000年毕业于石家庄铁道学院交通土建专业, 现为博士研究生, 主要从事节理岩体及地下工程设计等方面的研究工作。E-mail: 0510020030@smail.tongji.edu.cn

deformation modulus declines indistinctly at first, while as failure approaching, even little confining declination would cause large decreases. (4) Shear strength parameter c under unloading conditions is 14% lower than that under conventional compression conditions; while φ is greater than that about 23%. These conclusions reveal the unloading properties of marble under high geostress conditions and offer important references for stability analysis of deep-buried tunnels.

Key words: rock mechanics; deep-buried tunnels; marble; unloading failure; mechanical properties; experimental study

1 引言

锦屏二级水电站地处雅砻江大河湾所包围的锦屏山区, 电站利用雅砻江 150 km 大河湾的巨大天然落差截弯取直, 开挖隧洞引水发电。水电站共有 4 条平行引水隧洞, 开挖衬砌后洞径 11.8 m, 隧洞长 16~19 km, 一般埋深 1 500~2 000 m, 最大埋深达 2 500 m, 属洞径大、埋深极大的大型引水隧洞。且引水隧洞处于为高应力地区, 长探洞中实测最大主地应力值为 42.11 MPa。隧洞围岩以大理岩、砂岩为主。

引水隧洞开挖时, 原有岩体应力平衡被打破, 一个或两个方向迅速卸荷。随着岩石力学的不断深入, 人们发现应力路径对岩石强度和变形有重要影响, 姚孝新等^[1]、许东俊和耿乃光^[2]开展了各种应力路径下岩石破坏试验, 认为通过符合实际工程应力变化的三轴试验研究岩石力学特性是很有必要的。近年来, 岩石卸荷研究得到了很大的发展, 吴玉山^[3]、李天斌和王兰生^[4]、尤明庆^[5]开展了许多三轴试验研究, G. Wu 和 L. Zhang^[6]、周小平^[7]、李建林^[8]在岩体卸荷理论研究方面则有很大的贡献。以上许多研究从不同工程岩体应力变化状况出发, 并设计了与工程开挖相一致的卸荷路径, 但用于解决具体工程问题的并不多。虽然结合三峡工程等重大项目开也展了一些卸荷试验研究^[8~10], 但主要都是解决边坡开挖引起的岩体稳定问题, 用于模拟和分析隧洞开挖问题的研究并不多见。

随着水能资源开发的不断深入, 深埋引水隧洞开挖稳定问题越来越突出, 且鲜有工程实例可资借鉴。因此, 文章结合锦屏二级水电站引水隧洞围岩实际应力环境, 开展了锦屏大理岩三轴卸荷以及卸围压多级破坏试验, 研究了高应力条件下岩石卸荷变形及强度特性, 为锦屏水电站引水隧洞的开挖稳定分析提供了可靠依据。

2 试验方案

2.1 试验条件

要实现隧洞开挖的真实模拟, 最好采用主应力不等的真三轴试验。结合现有条件及已有研究成果, 本文选用等围压三轴试验方式。试验在 MTS 815.02 电液伺服控制的岩石力学三轴试验机上进行。

试样选用大理岩(T₂Y⁵), 取自锦屏二级水电站正在开挖的辅助洞, 取样里程约为 BK13+231。试验前加工成直径 50 mm, 高度 100 mm 的圆柱体试样, 试件精度满足岩石力学试验要求。试验是对自然风干的岩样进行的, 其风干密度为 $2.69 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 85 GPa, 泊松比为 0.26。

2.2 卸荷应力路径

在室内等三轴试验条件下, 岩样卸荷可分为两种情况: 卸除轴向荷载或卸除围压。研究岩石在循环加卸载过程中的力学性质^[11, 12]就属卸除轴向荷载。而关于围压卸荷, 则既有保持轴向应力恒定的同时降低围压, 又有增加轴向应力同时降低围压, 还有保持轴向变形恒定的情况下卸除围压等。

本次试验采用保持岩样轴向应力 σ_1 恒定, 卸除围压 σ_3 的路径。为保证破坏后效应测试, 破坏前轴向采用应力控制, 破坏后转换成应变控制。另外, 为了模拟洞室分步开挖对围岩的影响, 参照加载多级破坏研究方法^[13, 14], 专门设计了几组卸围压多级破坏试验。

2.3 卸荷应力水平设计

为设计岩样卸荷应力水平, 首先进行了大理岩单轴压缩试验和不同围压下的常规三轴压缩试验。

单轴压缩试验表明, 岩样单轴抗压强度最大值为 77.3 MPa。三轴压缩试验表明, 围压大于 20 MPa 开始, 岩样已经具有明显的屈服台阶, 40 MPa 时表现出典型的弹塑性材料特性。

为使三轴试验既能客观再现岩石实际应力环境, 同时又能确保试验的可行性(MTS 815.02 试验机设计围压最高为 50 MPa), 本次试验岩样应力水

平设定为：围压 40 MPa、初始应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)大于岩石单轴抗压强度。各岩样初始应力条件见表 1。

表 1 三轴卸荷试验各岩样初始应力条件

Table 1 Initial stress conditions of specimens in triaxial unloading tests

岩样编号	σ_1 /MPa	σ_3 /MPa	备注
2 [#]	99.9	20	
3 [#]	129	30	
4 [#]	160	40	
5 [#]	160	40	多级破坏
6 [#]	214	40	峰后卸荷
7 [#]	160	40	多级破坏
8 [#]	160	40	
9 [#]	165	40	多级破坏

3 变形规律

3.1 典型加、卸荷试验曲线

以静水压力状态时的变形作为应变轴的起点，得到岩样加载和卸围压试验的应力 - 应变曲线分别如图 1, 2 所示(围压均为 40 MPa)。轴向压缩破坏是使轴向应力增加到岩样的承载能力，而卸荷破坏则是使承载力降低到岩样的轴向应力而导致屈服破坏^[5]，因此，两种应力路径下变形曲线有诸多不同。

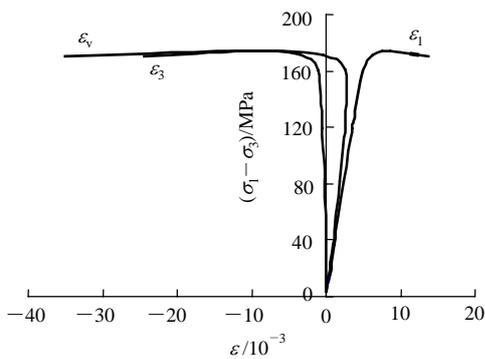


图 1 4[#]岩样加载全过程应力 - 应变曲线

Fig.1 Complete stress-strain curves of marble specimen #4 in triaxial compression test

由图 1 可知，围压 40 MPa 的轴向压缩试验条件下，大理岩具有较典型的弹塑性材料的特性，即具有明显的屈服特征。屈服前轴向应变约为 6×10^{-3} ，且屈服后并不立即进入软化阶段，而是经过相当大的塑性变形后才发生宏观破坏(图中没有完全描述峰后部分)。

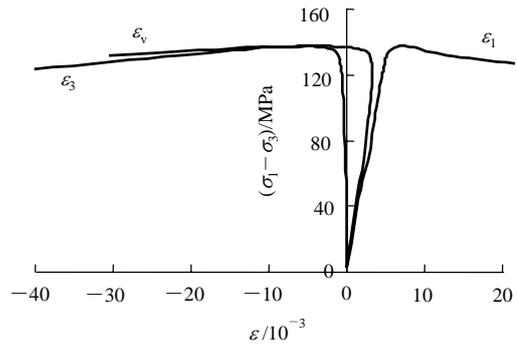


图 2 4[#]岩样卸荷全过程应力 - 应变曲线

Fig.2 Complete stress-strain curves of marble specimen #4 in triaxial unloading test

图 2 所示为 4[#]岩样卸荷全过程应力 - 应变曲线，卸荷前围压也是 40 MPa。岩样进入屈服时的围压约为 22.3 MPa，围压降低了 17.7 MPa。与图 1 相比，图 2 中变形曲线峰值明显较低，说明卸荷破坏时围压减小量比加载破坏时轴压增加量小得多，因此，卸荷更容易引起岩石破坏；卸荷变形曲线屈服台阶明显较短，表明岩样塑性有所减弱。4[#]岩样轴向应变发展到 8×10^{-3} 左右时，应力 - 应变曲线突然跌落，岩样迅速软化并在短时间内发生破坏。

3.2 卸荷阶段变形特征

图 3 所示为 5[#]和 9[#]岩样峰前变形曲线，其中虚线处为卸围压的起始。由图 3 可知，卸围压前后两个岩样的变形规律均出现了明显的变化：轴向应变曲线斜率突然增大，说明轴向压缩变形增速减慢；侧向应变曲线斜率稳步变小，表明侧向变形加速增长；体积应变曲线出现突然左拐，说明岩样从压缩迅速转化为膨胀。而且，岩样从卸围压一开始就表现出体积膨胀。

在实际情况下，岩石承受压差是客观存在的，而且在长期的压力差的作用下，岩石加载部分的变形已经完成。因此，可以将加载引起的岩石变形忽略不计，只研究由于卸围压引起的变形，并假定这部分变形从零开始。由此，可得到 9[#]岩样仅由于围压卸荷引起的变形曲线(见图 4)。

由图 4 可知，在不考虑初始压缩变形的情况下，岩样卸荷变形规律为：在卸荷初始阶段，侧向变形和轴向变形数量相差不大，但侧向变形增长速率明显快于轴向变形。表现在应力 - 应变曲线上，侧向应变曲线比较平滑，并迅速向左发展，表明应变一直处于加速增长；而轴向应变曲线向右发展的趋势较弱，并有一定的起伏，表明应变增速较慢，且不十分稳定；变形曲线最突出的特征是：体积应变曲

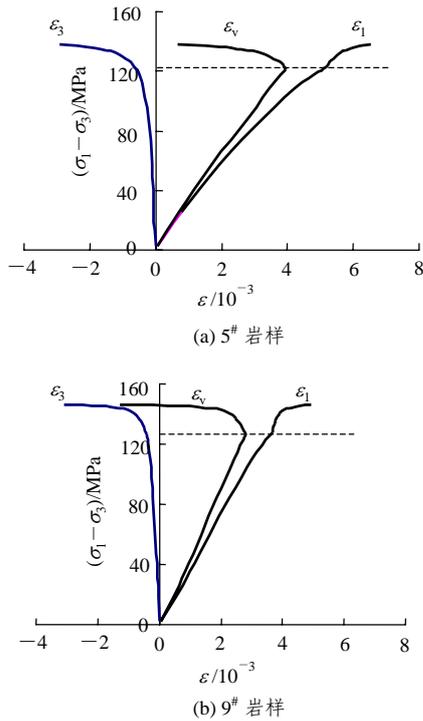


图 3 卸荷阶段应力 - 应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of specimens during the confining pressure unloading stage

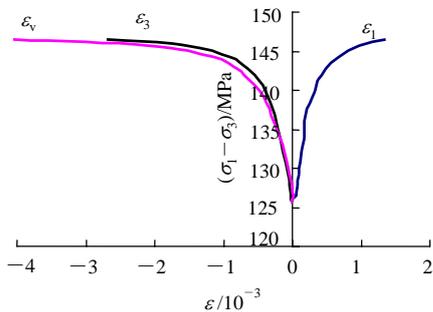


图 4 忽略初始压缩变形后 9#岩样卸荷阶段应力 - 应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of specimen No.9 during the unloading stage neglecting the initial deformation

线比较光滑, 在破坏前没有明显的突变, 其增长规律取决于侧向变形的发展规律。

3.3 泊松比和变形模量变化

岩石力学中, 泊松比通常利用单轴压缩条件下岩样侧向应变 ε_3 和轴向应变 ε_1 的比值来确定:

$$\mu = -\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} \quad (1)$$

$$\mu' = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (2)$$

根据式(1)确定的称为切线泊松比, 而根据式(2)求得的称为割线泊松比。

这里把相同应力差作用下侧向应变和轴向应变之比仍然称作泊松比, 并按式(2)求割线泊松比。

图 5 所示为卸围压过程中泊松比变化曲线。这 4 个岩样初始应力水平大致相同, 虽然岩样离散性导致泊松比在数值上存在一定的差异, 但就总体而言, 其变化规律则有较好的一致性。具体为: 卸围压过程中, μ 随围压降低不断增大, 两者之间呈非线性关系。通过对图中各曲线拟合, 发现 4 次多项式关系可以较好反映泊松比变化随围压降低的规律。

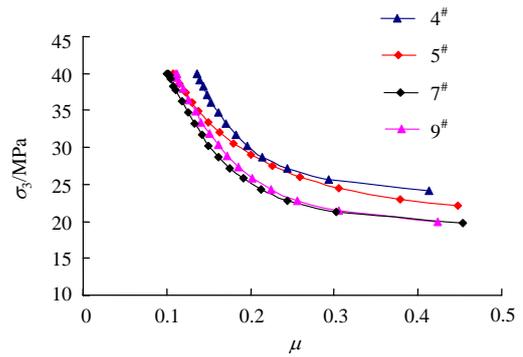


图 5 卸围压过程中泊松比变化曲线

Fig.5 Variation curves of the Poisson's ratio during confining pressure unloading

图 6 所示为卸围压过程中变形模量的变化曲线。其中 5#岩样破坏时的围压为 20.9 MPa, 在围压大于 25 MPa 的范围内, 变形模量变化趋势并不显著, 变化幅度也较小。而当围压小于 25 MPa 后, 曲线左拐趋势明显增强, 变形模量在短时间内迅速减小, 表明岩样已接近屈服破坏。从图 6 中可以看出, 其他 3 个岩样变形模量的变化也具有大致相同的规律。

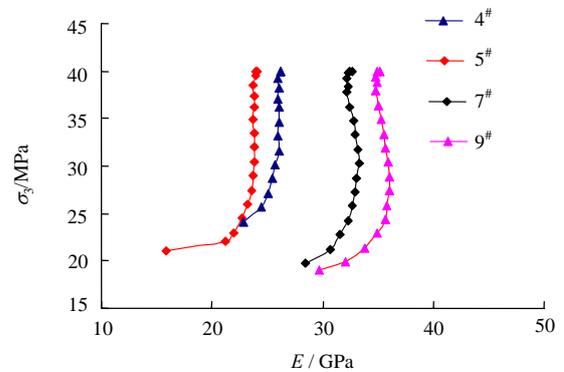


图 6 卸围压过程中变形模量变化曲线

Fig.6 Variation curves of the deformation modulus during the confining pressure unloading

4 破坏特征

表 2 列举了部分岩样破坏时的轴压 σ_1 和围压 σ_3 ，图 7 给出了这些岩样最终的破坏形态，其中 2[#]、3[#]和 4[#]岩样为一次性卸荷破坏，而 5[#]、7[#]和 9[#]岩样为多级卸荷破坏。

表 2 岩样应力状态
Table 2 Stress conditions of specimens

岩样 编号	初始应力水平		破坏状态	
	σ_1 /MPa	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	σ_3 /MPa
2 [#]	99.9	20	99.90	7.56
3 [#]	129.0	30	129.00	12.10
4 [#]	160.6	40	160.40	23.10
5 [#]	160.2	40	113.60	10.60
7 [#]	159.7	40	83.06	2.56
9 [#]	165.7	40	95.32	2.12



图 7 大理岩卸荷破坏形态
Fig.7 Failure modes in triaxial unloading tests

首先比较一次性卸荷破坏的最终形态。从图 7 中可以看出，4[#]岩样应力水平最高，破坏时略呈现鼓状，并表现为一对共轭剪切破裂带。而 2[#]岩样应力水平最低，表现为单个宏观剪切破裂面，破坏面

的倾角也最陡。同时，2[#]、3[#]和 4[#]岩样，随着破坏时围压的逐步提高，破坏面逐渐变得不明显。

再分析多次卸荷并最终破坏的形态。由表 2 可知，4[#]、5[#]、7[#]和 9[#]岩样初始应力大致相同，但由于经历的卸荷过程不同，岩样最终破坏时的围压存在较大差异。其中 4[#]为一次性卸荷破坏，5[#]在破坏前已经经历过一次卸荷阶段，而 7[#]和 9[#]岩样破坏前已经经历过 2 次卸荷阶段。从破坏形态来看，4[#]岩样表现为一对共轭剪切破裂带，5[#]岩样虽然也表现为一对共轭剪切破裂带，但破坏面较 4[#]岩样显著得多，7[#]、9[#]岩样则表现为单个宏观剪切破裂面。再比较 2[#]和 7[#]、9[#]岩样，尽管这 3 个岩样卸荷前初应力水平各不相同，并且有的差异很大，但由于破坏时围压比较接近，破坏形态也较为相似。

5 强度特征

图 8 所示为大理岩破坏状态时 σ_1 、 σ_3 关系，其中矩形点代表卸围压破坏强度数据，共 13 组。菱形点代表常规加载破坏强度数据。图 8 中两条直线分别为加载、卸荷强度数据拟合所得到的直线。

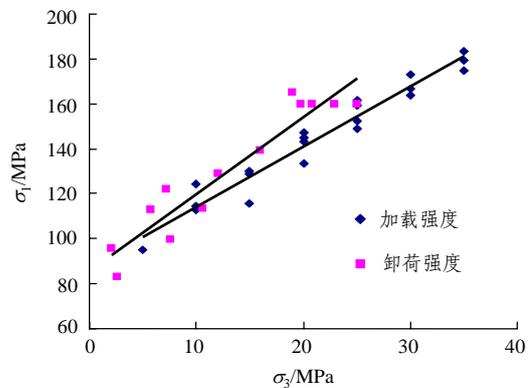


图 8 大理岩加载、卸荷强度
Fig.8 Strength values of marble specimens from triaxial loading and unloading tests

以主应力形式表示的 Mohr-Coulomb 强度准则为： $\sigma_1 = M + N\sigma_3$ ，其中 M 和 N 均为强度准则参数，它们与黏聚力和内摩擦角的关系分别为： $M = 2c \cos \varphi / (1 - \sin \varphi)$ ， $N = \tan^2 (45^\circ + \varphi / 2)$ 。分别对大理岩加载、卸荷强度数据进行线性回归，并按照 Mohr-Coulomb 强度准则确定其抗剪强度参数，结果列于表 3。

表 3 大理岩加载、卸荷强度参数

Table 3 Strength parameters from triaxial loading and unloading conditions respectively

破坏 路径	M/MPa	N	相关 系数 R	黏聚力 c/MPa	内摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$
加载	87.5	2.67	0.975	26.8	27.1
卸荷	85.2	3.45	0.950	22.9	33.4

6 结 论

本文结合锦屏二级水电站引水隧洞的深埋应力条件, 通过该区域典型大理岩的卸围压破坏试验以及卸围压多级破坏试验研究, 主要得到如下结论:

(1) 相同初始条件下, 岩石达到卸荷破坏时围压的减少量明显小于压缩破坏时轴压的增加量, 表明卸荷更容易导致岩石破坏。

(2) 卸荷开始后岩样侧向变形增长显著加快, 同时表现出扩容特性, 如果忽略卸荷前由于压缩产生的变形, 则体积应变几乎完全按照侧向应变的规律增大。

(3) 卸围压过程中, 泊松比随围压变化规律可以用四次多项式描述; 变形模量初期变化幅度不显著, 但当围压降低到屈服前一定程度后, 微量围压减少引起变形模量急剧减小。

(4) 高应力条件下, 岩样破坏形态在很大程度上取决于破坏时围压的高低, 而岩样初始应力状态和破坏路径对其产生的影响则相对较小。

(5) 大理岩加载、卸荷破坏条件下抗剪强度参数存在较大差异, 卸荷条件下 c 值比加载条件下低 14%, 而 φ 值比加载条件下高 23%。

致谢 本文相关试验得到了同济大学龚志明老师和中国矿业大学李玉寿老师的大力支持和帮助, 在此深表感谢!

参考文献(References):

[1] 姚孝新, 耿乃光, 陈 颢. 应力途径对岩石脆性-延性变化的影响[J]. 地球物理学报, 1980, 23(3): 312 - 319.(YAO Xiaoxin, GENG Naiguang, CHEN Yong. The effect of stress path on brittleness and ductility of rocks[J]. Acta Geophysica Science, 1980, 23(3): 312 - 319.(in Chinese))

[2] 许东俊, 耿乃光. 岩体变形和破坏的各种应力途径[J]. 岩土力学, 1986, 7(2): 17 - 25.(XU Dongjun, GENG Naiguang. The various stress paths causing deformation and failure in rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, 7(2): 17 - 25.(in Chinese))

[3] 吴玉山. 应力路径对凝灰岩力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 112 - 120.(WU Yushan. The effects of the process of stresses on mechanical properties of Tuff rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(1): 112 - 120.(in Chinese))

[4] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321 - 327.(LI Tianbin, WANG Lansheng. The laboratory study on deformation and destruction characteristics on basalt under stress relief condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 321 - 327.(in Chinese))

[5] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京: 地质出版社, 2000.(YOU Mingqing. Strength, deformation and failure process of rock specimens[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.(in Chinese))

[6] WU G, ZHANG L. Studying unloading failure characteristics of a rock mass using the disturbed state concept[J]. Int. J. Rock. Mech. Min. Sic., 2004, 41(Supp.1): 181 - 187.

[7] 周小平. 裂隙岩体卸荷本构理论研究及其应用[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2000.(ZHOU Xiaoping. The constitutive model for crack-weakened rock masses under unloading with application[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2000.(in Chinese))

[8] 李建林. 卸荷岩体力学理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(LI Jianlin. Theory and application of rock mass mechanics under unloading conditions[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))

[9] 陶履彬, 夏才初, 陆益鸣. 三峡工程花岗岩卸荷全过程特性的试验研究[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 330 - 334.(TAO Lubin, XIA Caichu, LU Yiming. Experimental studies on the total course behavior of unloading of granite on Three Gorges Project of the Yangtze River[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(3): 330 - 334.(in Chinese))

[10] 高春玉, 徐 进, 何 鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456 - 460.(GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456 - 460.(in Chinese))

[11] BRADY B H G, CARMER M L, HART R D. Technical note: preliminary analysis of a loading test on a large Basalt block[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1985, 22(5): 345 - 348.

[12] SHEN B, STEPHANSSON O. Cyclic loading characteristics of joints and rock bridges in a jointed rock specimen[C]// BARTON N R, STEPHANSSON O ed. Proc. Int. Symp. Rock Joints. [S. l.]: [s. n.], 1990: 725 - 729.

[13] KOVFIK K, TISA A. Multiple failure state and strain controlled triaxial tests[J]. Rock Mechanics, 1975, 7(1): 17 - 33.

[14] CAIN P, YUEN C M K, LE BEL G R, et al. Triaxial testing of brittle sandstone using a multiple failure state method[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, 10(4): 213 - 217.